

· 特邀综述 ·

WDM 网上运行 IP 的研究*

李乐民**

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 对 WDM 网上直接运行 IP 的有关研究作了论述; 阐述了 IP over WDM 的网络结构, 其网络采用光分插复用器(OADM)和光交叉连接器(OXC), 实例说明了采用 OXC 时的网络物理结构和逻辑结构。讨论了帧结构、路由选择和波长分配以及网络抗毁等问题。

关键词 波分复用网; 网际协议; 路由选择和波长分配; 网络抗毁

中图分类号 TN913.2

因特网业务的爆炸式增长促进了宽带通信网的建设。WDM(Wavelength Division Multiplexing, 波分复用)传送网和高速交换路由器技术的发展对建设宽带通信骨干网提供了有力的支持。目前, 单光纤单波长上的传输速率可达320 Gb/s, 单光纤上波分复用波长数可达1 022个, 单光纤上波分复用容量可达6.4 Tb/s; Pluris 公司的 Pluris 20000 TNR(Terabit Network Router)的交换结构容量可达184 Tb/s, 有10 Gb/s 接口(见 www.pluris.com)。欧洲 i-21网在一个路由上通信容量设计达1 000 Tb/s 级(10 Gb/s×160波长×192光纤对×5管)^[1]。各种形式的数据业务量急剧增长, 促使传统的电路交换向包交换(分组交换)演进, 这种演进的意义可以和历史上的模拟向数字演进相比拟。为了在宽带骨干网上运行 IP 分组业务, 引发了 IP over ATM、IP over SDH 和 IP over WDM 的争议。其中, IP over WDM 不采用 ATM 和 SDH 设备, 以节省成本, 提高竞争力, 且是研究的热点。本文对 IP over WDM 的有关研究作论述。

1 IP over WDM 的网络结构

IP over WDM 的广域网或城域网内, 设有若干 IP 路由器, 通过光纤网络相连。在初始阶段, 可以用 WDM 提供点到点连接的光路。如果有些路由器间没有直通光路, 则可以通过其他的路由器作多跳连接。进一步可采用光分插复用器(OADM——Optical Add/Drop Multiplexer)和光交叉连接器(OXC——Optical Cross-Connect), 提供可调度的光路^[2]。

图1是网络物理结构的一个例子^[3]。图中, 有5个 OXC ABCDE, 5个路由器 $S_1 \sim S_5$, 每个路由器有网络接口与 OXC 相连, $l_1 \sim l_6$ 是物理链路, 将两个 OXC 相连。其中, 一条物理链路包含一对光纤供双向运用, 有些 OXC 间没有物理链路相连。更一般的情况是一条物理链路包含多根光纤供不同

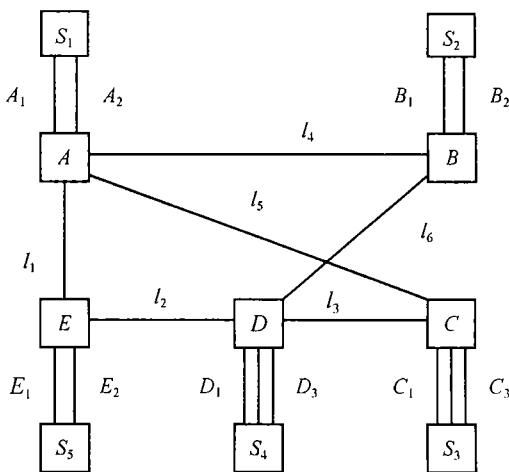


图1 网络的物理结构

2000年5月28日收稿

* 国家自然科学基金资助项目, 基金号: 69990540

** 男 68岁 大学 教授 博士生导师 中国工程院院士

方向运用，一根光纤上可采用多个波长。

无波长变换的 OXC 的作用是将一根输入光纤上的某一波长信号连到任一根输出光纤的同一波长上。若有波长变换，则可连到任一根输出光纤的任一波长上。适当安排路由和分配波长，可为路由器间建立光路。在一根光纤上，不能为不同光路分配相同波长。图2a 为图1建立的光路例子。将图2a 的光路连接用图2b 来表示，称为逻辑结构，也称逻辑拓扑或虚拓扑。光路 O_6 经过两条物理链路 l_4 、 l_5 ，由于中间经过一个 OXC 的光跳转，光路质量会有所下降。图2b 中，端口 B_2 可以通过光路 O_6 和端口 C_3 相连。 B_2 到 C_3 可有多条路径， O_6 是最近的，也可以经过 O_4 、 O_5 、 O_3 ，或 O_4 、 O_5 、 O_1 、 O_2 连接，但需要路由器转接，即电的多跳连接。 A 与 B 间没有直通光路，至少需经 C 电跳一次。

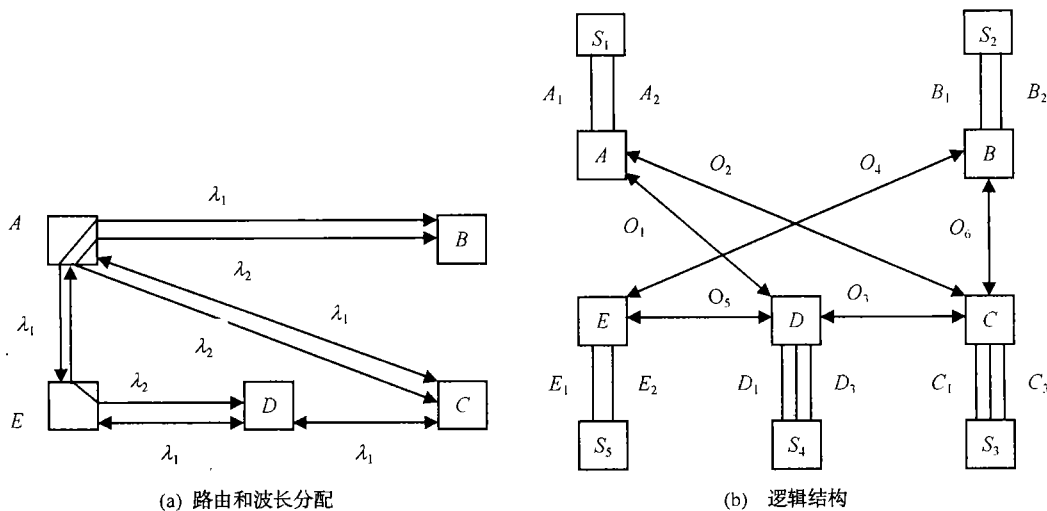


图2 光路实例

对于 IP over WDM 的网络，需要研究网络设计问题。即给定 IP 路由器间的通信业务量需求，设计网络的逻辑拓扑结构^[4-6]，涉及光路的路由选择和波长分配问题。且由于宽带网络上运行的数据量大，网络抗毁设计是重要问题。由于 IP over WDM 不采用 ATM 和 SDH 设备，ATM 和 SDH 提供的一些必要或有效的功能宜予保持，其中包括将 IP 分组(包)装入帧内在光纤上的传输。

2 帧结构

从帧结构和线路编码的角度，需对 IP 传送的方案进行研究，还要考虑以下几个问题：

1) 便于 IP 分组的装取。其中有 IP 分组的定界方案，IP 分组经线路传输后，接收端要能识别出 IP 分组的起始和结束时间位置。对于 IP over ATM，AAL5 适配中能识别 IP 分组的起始。对于 IP over SDH，采用的 HDLC(High-level Data Link Control)有定界功能^[8]。对于 IP over WDM，也应有定界方案。

2) 具有适合的控制和管理用码，也可考虑在网络中采用控制和管理 IP 分组。

3) 适于线路传输。通常，线路编码的作用有：

(1) 产生足够的 0、1 变化，有利于收端的位定时恢复；

(2) 可用来监测线路误码率；

(3) 若采用差错控制编码，可降低光纤线路的信噪比要求^[7]，特别是在传输速率达 10 Gb/s 时。

目前，对于 IP over WDM，一种方案是使用 Gb/s 以太网(可达 10 Gb/s)的帧结构。它虽没有 SDH 那样多的网络状态信息，但成本较低。另外，有利于桌面到骨干网协议的统一。但是，吉比特以

太网的8B/10B 线路编码却不可取，因为该编码将线路速率提高为1.25倍，对长距离传输不利，以后可能会采用类似于SDH中使用的同步置位式扰码。

另一种方案是借鉴SDH，但需作一些修改，包括开销设置以及IP分组的装取等。为了分组定界；IP over SDH中采用了HDLC，但是HDLC要在发端插入替换字节，在收端进行反插操作，这在高速应用(如超过2.5 Gb/s)中实现不易。为此，朗讯(Lucent)公司提出一种SDL(Simplified Data Link, 简化的数据链路)来替代HDLC^[8]。在SDL帧中设有帧头，包含净荷长度指示字节和帧头的CRC(Cyclic Redundancy Check, 循环冗余校验)等，该帧中的信息域具有独立的CRC。SDL帧的定界可以用两种状态来描述。在初始捕获状态，可以用SDH帧中的H4字节或曾用于ATM的CRC校验法来进行帧定界；在维持状态，依靠净荷长度指示值来定界，同时用帧头中的CRC来加以确认。如果认为定界有错，则回到捕获状态。SDL帧的长度是变化的，如果长度指示字节在传输中发生错误，将造成定界失误。为此，帧头中的CRC具有纠一个比特错误的能力。此外，目前正在研究如何在帧头中加入QoS(Quality of Service)和复接功能。这样，SDL就成了ATM的变形，但具有完全可变的信元长度。

SDL有分组定界功能，所以不一定要放在SDH帧结构中再在光纤上运行，而可以直接在光纤上运行，以求简化。但是，为了和SDH传输系统兼容，并提供管理和纠错功能，Lucent公司提出一种高速同步帧(High-speed Synchronous frame, HSSF)^[8]，如图3所示。帧周期为125 μ m，采用与SDH相同的帧同步码 A_1 、 A_2 。具有链路状况码，用于链路故障和性能管理。SDL定位码用于SDL的初始定界。FEC(Forward Error Correction)用于在WDM线路上传输速率达Gb/s级时降低对信噪比的要求。HSSF对SDH帧结构作了简化，减小了实现的复杂性。

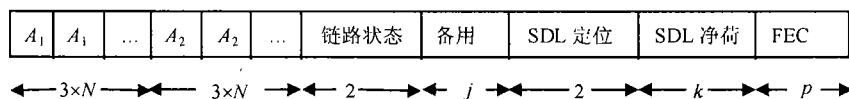


图3 HSSF帧结构

3 路由选择和波长分配

IP over WDM的网络设计是一个综合性的复杂问题，其最终目的是满足用户对通信的需求。通常，先要有一个网络的物理拓扑结构(见图1)，可以是已经存在的，也可以是新规划的。然后，再设计逻辑拓扑结构(见图2)，主要是确定一组光路，并确定每条光路的路由和波长分配。

在有关文献中，通常对WDM网中的路由选择和波长分配(RAW)问题定义为：给定一个网络的物理拓扑和一组光路连接要求，对每一光路连接确定一个路由并分配波长。其波长分配的约束条件有：

- 1) 在一根光纤上经过多条光路时，这些光路的波长应互不相同；
- 2) 若OXC中无波长变换，则一条光路采用的波长应连续不变。

若网络中的所有OXC都具有完全的波长变换，即任一根输入光纤上的任一波长都能经交换连接到任一根输出光纤上的任一波长，则光交换网的性能等同于电路交换网的性能。为了节省成本，可以只采用无波长变换的OXC。还有折衷的方法是网络中只有少数节点上设置有波长变换的OXC，称为稀疏波长变换，或是网络中的OXC只具有部分(有限)波长变换。

RAW设计中，节点间的光纤数可以是一根(单向)、一对(双向)或多根、多对，可以不给约束而只提出尽量少，也可以给定光纤数。对于一根光纤上的波长数，可以不给约束而只提出尽量少，也可以给定波长数。对于上述提到的约束，实际的情况常是给定最大数并尽量少。

文献[9]对 WDM 传送网的设计和性能作了较详细的综述, 涉及静态和动态连接问题, 比较了无波长变换和有波长变换时的性能。最近, 还陆续有较多论文发表, 例如, 研究多光纤问题^[10], 波长变换器的最佳布置问题等^[11]。

上面讨论的 RAW 问题中, 对于给定一组光路连接要求, 再作路由和波长分配, 但是, 在 IP over WDM 网络的设计中, 给定的是路由器间的业务流量要求。路由器面对的是逻辑拓扑—光路集, 逻辑拓扑在被设计之列。文献[4~6]研究了在给定的静态业务量矩阵条件下, 逻辑拓扑的设计问题, 包括路由和波长分配。文献[8]称这种设计考虑了 IP 的电路由(电连接可能经过多条光路, 即多跳电连接)和光路的路由(光路可能经过多条物理链路), 是一种综合的路由解。这种设计中采用的优化目标有多种, 例如, 使总的平均分组时延最小; 又如, 使最大的光路业务量最小, 其益处是使业务量矩阵按比例增大时, 网络不易拥塞。不过, 文献 [4~6] 的研究中假定无波长变换, 只有文献 [6] 提到该文的参考文献[4]考虑了有波长变换的情况, 说明还应研究在增加波长变换情况下, 对综合路由的性能有多少改善。

文献 [4~6] 考虑的是静态业务量需求下的设计, 而实际情况是业务量需求会改变。当然, 对网络作调整的间隔时间可较长, 例如, 1天, 几天或更长。在业务量有动态变化时, 网络资源是否能满足新的业务量需求就需要研究。RAW 问题中对动态情况下研究的阻塞概率在这里就有一定参考价值。

到目前为止, 综合路由的研究停留在分组业务情况下的网络设计问题, 分组交换可以是路由器, 也可以是 ATM 交换机, 未涉及 IP 网络的具体路由机制。

近年来, 为了改善 IP 网络的服务质量(QoS), 提出了 MPLS(Multiprotocol Label Switching, 多协议标签交换)。采用 MPLS 后, IP 分组在进入一个具有 MPLS 功能的网络区域时, 获得一个标签, 然后根据这个标签对分组进行分类和转发, 在网络的电转接节点中不需再识别复杂的路由地址, 简化了处理, 大大提高了分组转发效率。实际上, MPLS 借鉴了不少 ATM 的优点。MPLS 可以在多种链路上工作。对 IP over ATM 体制, 标签可以放在 ATM 信元头的 VPI 和 VCI 域。对 IP over WDM 体制, 可以采用一个4字节的填充码^[12]。采用标签交换的路由器也称标签交换路由器。这样, 图1中 WDM 网面对的是标签交换路由器。MPLS 网中需采用标签分发协议(Label Distribution Protocol, LDP)等。改善 IP 网络 QoS 的一些措施, 如区分服务、受限路由选择等都可以和 MPLS 配合使用。即受限路由包含了 QoS 路由选择, 除了保证质量外, 还要使网络的资源得到最佳利用。WDM 网络的路由机制如何和 MPLS 网络或 IP 网络的路由机制相结合是有待进一步研究的问题。

IETF(Internet Engineering Task Force)的草案中已提出对 OXC 的控制面仿照 MPLS 的控制面来设计, 以利于网络的控制。

4 网络抗毁

IP over WDM 网的抗毁研究也是近年研究热点。文献[3]认为, IP 网络的路由功能可在下层网络有故障时通过改变路由而恢复通信, 因此, 不必化太多的成本来保证 WDM 网络的抗毁。但是,

文献[3]指出, 当有一条光纤物理链路断裂而要保证通过改变路由而恢复通信, 必须注意恰当地设计逻辑拓扑结构。以图1、2的例子来说明。若图1中的 l_4 断裂, 从图2a、b 可看出这会引入 O_6 和 O_4 光路不通。路由器 S_2 和 S_3 间在平时可利用 O_6 通信, 还有两条路由 O_4 、 O_5 、 O_3 和 O_4 、 O_5 、 O_1 、 O_2 作备用。 l_4 断裂后, O_6 不通, 而两条备用路由中因为有 O_4 , 也不通, 所以无法通过改变路由而恢复 S_2 和 S_3 间的通信。究其

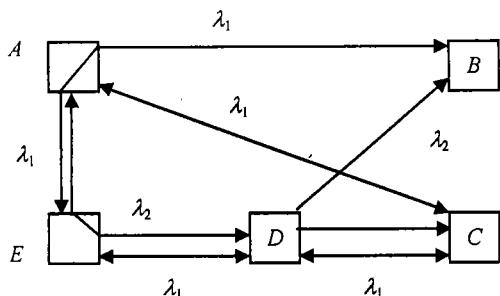


图4 可抗毁的路由选择和波长分配

原因,是因为 O_6 及其他两条备用路由不是独立的,若路由器认为有了备用路由就可以抵抗故障就错了。正确的设计方法是使一条光纤断裂不会造成备用路由也不通。对于此例,若将图2a 改为用图4的路由和波长分配来构成光路,则所得逻辑结构仍是图2b,但可做到任一光纤断裂,路由器间仍能恢复连通。根据这个思路,文献[3]提出了设计保护的概念并研究了相应的算法。

通常认为,单依靠 IP 层来抗毁,恢复时间较长,例如达到秒级,不能保证实时业务的通信质量。而 SDH 自愈环的恢复时间可小于50 μ s。但是,采用上节提到的 MPLS 后,也可做到恢复时间小于50 μ s(见www.cisco.com中关于吉比特交换路由器1201b GSR 等说明)。这样,使 IP over WDM 网的抗毁性能更前进了一步。

文献中对 WDM 的保护和恢复有较多研究,最近还有论文发表^[13]。光层的保护及恢复可以是基于链路的点到点保护,也可以是基于光路的保护或恢复,具有可供选择的方案多、灵活性强、恢复速度快(一般在50 ms 以内,甚至小于10 ms)、资源利用率高和成本相对较低等特点。光层可提供透明的光路,运行不同的信号和协议,且支持直接运行 IP。

对于 IP over WDM 网的抗毁,如下一种设计思想不同于电路交换网的抗毁。在电路交换网中,为了保证网络有故障时仍提供原先的电路数,需安排一定的空闲资源,这使效益减少。在 IP over WDM 网中,可使平时所有资源都用于通信,而在网络有故障时,由剩余的资源来维持通信。由于 IP 网有统计复用功能,资源的减少相当于业务量强度增大,网络的性能有所下降,但仍能沟通。也可以采用 IP 网中保证 QoS 的措施,维持某些业务的 QoS,而对那些只需尽力传送的业务采用 RED(Random Early Detection) 等机制进行拥塞控制。Cisco 公司的 DPT(Dynamic Packet Transport)双向环网采用了这种设计思想,实现了 IP over Fiber。

5 结束语

回顾光纤宽带通信网的发展^[2,14],可看到新技术的不断出现。本文对 IP over WDM 网的有关研究作了论述。可以看出,还有较多问题有待研究。本文讨论的 WDM 网中,采用的是能调度光路的 OXC,这在近期就有实用价值。远期的研究是光分组交换,但离实用还远。值得注意的是向光分组交换靠近的方式,例如光流交换和光突发交换^[15],在光域实现 MPLS。

参 考 文 献

- 1 Richards K. New pan-European network to support petabit speeds. Lightwave, August, 1999: 25, 38
- 2 李乐民.宽带光纤通信网. 电子科技大学学报, 1992, 21(增刊): 11~16
- 3 Crochat O, Le Boudec J Y. Design protection for WDM optical networks. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(7):1 158~1 165
- 4 Mukherjee B, Banerjee D, Ramamurthy S, *et al.* Some principles for designing a wide-area WDM optical network. IEEE J Select Areas Commun, 1996, 14(5): 840~851
- 5 Banerjee S, Yoo J, Chen C. Design of wavelength-routed optical networks for packet switched traffic. J Lightwave Technology, 1997, 15(9): 1 636~1 646
- 6 Krishnaswamy R M, Sivarajan K N. Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changes. IEEE Infocom, 1998: 917~927
- 7 郭贺铨. 面向 IP 的 SDH 技术. 中国通信, 1999, 8(22): 63~67
- 8 Anderson J, Manchester J S, Rodriguez Moral A, *et al.* Protocols and architectures for IP optical networking. Bell Labs Tech J, 1999, 4(1): 105~124
- 9 Karasan E, Ayanoglu E. Performance of WDM transport networks. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(7): 1 081~1 096

- 10 Xu S Z, Li L M, Wang S. Dynamic routing and assignment of wavelength algorithms in multi-fiber WDM networks. IEEE 8th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N'99), Boston 1999
- 11 Subramaniam S, Azizoglu M, Somani A K. On optimal converter placement in wavelength-routed networks. IEEE/ACM Trans Networking, 1999, 7(5): 754~766
- 12 吴 靖, 蔡向阳, 金跃辉等译. IP 交换技术协议与体系结构. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 13 Mohan G, Somani A K. Routing dependable connection with specified failure restoration guarantees in WDM networks. IEEE Infocom, 2000
- 14 唐明光. 从 ECOC'94 看光纤通信的发展. 电子科技大学学报, 1994, 23(增刊):203~209
- 15 Modiano E. WDM-based packet networks. IEEE Communications Magazine, 1999, 37(3): 130~135

Research on IP over WDM Networks

Li Lemin

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, a discussion of research on IP over WDM networks directly is provided. The network structure including optical add/drop multiplexer and optical cross-connect is described. The physical and logical structures are presented with an example. The frame structure, routing and assignment of wavelength, and network survivability are discussed.

Key words wavelength division multiplexing; networks; Internet protocol; routing and assignment of wavelength; network survivability

· 科研成果介绍 ·

宽带大功率行波管高频系统与注波相互作用设计程序软件包

主研人员: 莫元龙 王 洁 邹长明 白安永 谢仲怜 李庆绩等

宽带大功率行波管是现代通信、雷达和干扰等军事和民用装备中的核心器件。其理论和设计计算十分复杂, 工艺技术要求十分精密。该软件包具有以下特点: 1) 考虑了谐波相互作用和谐波耦合特性; 其二维程序采用改进的二维宏粒子模型, 提高了计算机结果的精确度; 2) 能计算多级速度跳变、任意位置的截断和集中衰减器; 3) 具有实时动态显示注波相互作用全过程的功能, 显示内容包括基波和谐波的输出功率、相互作用效率、增益、基波谐波功率比、速度相位群聚特性等; 4) 用格林函数计算空间电场, 精确地计算出高频系统特性: 色散、耦合阻抗和衰减常数; 5) 输入输出的设计程序能给出阻抗匹配要求的参量等。该课题研制出功能齐全、实用性强的设计程序软件包, 提高了设计水平, 缩短了设计周期。

· 科 卞 ·